

XIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO XIII
EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E MATERIAIS DE SUBESTAÇÕES (GEM)

AVALIAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA CROMATOGRAFIA LÍQUIDA DE ALTO DESEMPENHO

Eng^o Antônio Carlos Teixeira Diogo
CESP - CIA. ENERGÉTICA DE SÃO PAULO

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é o de apresentar a sistemática adotada pela CESP para identificação dos seus transformadores de transmissão considerados mais envelhecidos, a partir da análise periódica do "teor furfural" presente em amostras de óleo isolante, determinado em laboratório pelo ensaio de cromatografia líquida de alto desempenho. São relatados alguns exemplos práticos de equipamentos que, após terem sido selecionados como transformadores envelhecidos, foram inspecionados internamente e o diagnóstico inicial confirmado; destacando-se que devido ao fato do envelhecimento ter sido determinado antes da falha elétrica, foi possível viabilizar soluções preventivas e economicamente mais vantajosas para cada caso.

PALAVRAS - CHAVE

Transformador - Envelhecimento - Furfural

1.0 - INTRODUÇÃO

O processo de envelhecimento de um isolamento celulósico de um transformador está diretamente associado com a resistência mecânica do seu papel isolante, que tem a característica de se depreciar progressivamente com o tempo de operação do equipamento, sendo influenciado por fatores tais como: temperatura, umidade e oxidação do óleo isolante. No final de vida a isolação se apresentará frágil e quebradiça, apesar de ainda manter boas condições dielétricas.

O Sistema de Potência da CESP é composto por 552 transformadores de transmissão (incluindo reservas) de tensão de 69kV até 550 kV, com idade média de 22,8 anos. A distribuição dos equipamentos CESP em operação por faixa etária, pode ser observada na Figura 1.

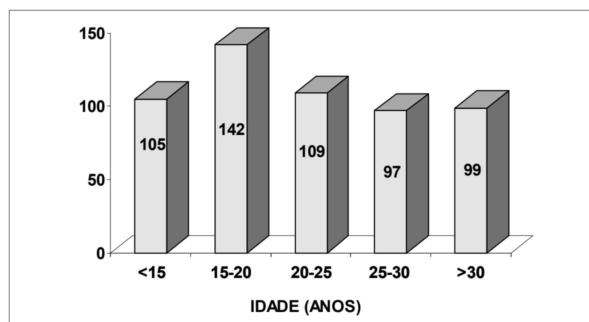


Figura 1

A CESP há 5 anos realiza a análise do "teor furfural" dissolvido no óleo isolante desses equipamentos, de maneira rotineira, utilizando a técnica de cromatografia líquida de alto desempenho.

O furfural é um composto que é gerado exclusivamente durante o processo de decomposição do papel isolante do equipamento; sendo que o controle de sua concentração ao longo do tempo permite uma avaliação de como está se desenvolvendo o processo de envelhecimento do transformador. Trata-se de uma técnica preditiva pois é necessário para a análise apenas a coleta de uma amostra de óleo, similar a utilizada para a cromatografia gasosa.

CESP - Companhia Energética de São Paulo
Av. Angélica, 2565 - 15º andar - São Paulo, S.P.
telefax: (011) 256-7011 ramal 509

Portanto o teor furfural na CESP passou a ser o principal indicador de envelhecimento dos seus transformadores, que em conjunto com outras análises rotineiras permite a obtenção de condições de diagnósticos aceitáveis, para indicação dos casos mais críticos.

2.0 - BANCO DE DADOS

No banco de dados da CESP existem aproximadamente 1840 resultados de teor furfural, dos transformadores de transmissão e reatores em derivação em operação; sendo a periodicidade adotada para as amostragens normais de 2,0 anos.

Algumas constatações interessantes podem ser obtidas apenas pela análise estatística dos resultados desses equipamentos, como por exemplo quando se analisa o envelhecimento da celulose em função do tipo do equipamento, como apresentado na Figura 2.

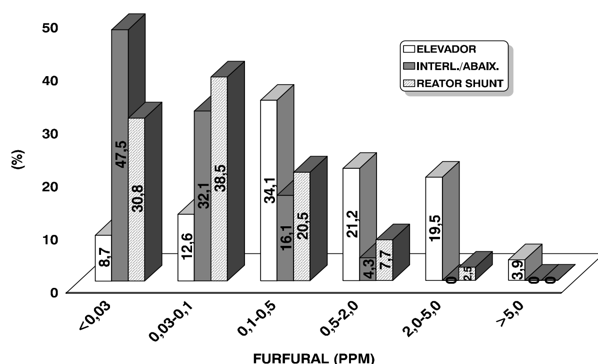


Figura 2

Pode-se observar que os transformadores que possuem um ciclo de carregamento mais acentuado (elevadores) apresentam valores médios de teor furfural bem mais elevados, indicando que nesses equipamentos o processo de envelhecimento da isolação celulósica é mais acelerado, ao contrário do observado para os transformadores interligadores/abaixadores e os reatores em derivação. Outra observação importante diz respeito a influência do sistema de preservação do óleo no envelhecimento, pois a média dos resultados do teor furfural dos equipamentos selados é 0,20ppm, contra 1,80ppm dos equipamentos "abertos", justificando todos os esforços no sentido da melhoria dos sistemas de selagem existentes e até modificações nos transformadores com respiro livre.

3.0 - FILOSOFIA PARA SELEÇÃO DOS CASOS DE ENVELHECIMENTO

A análise da concentração do teor furfural permite a seleção de dois tipos distintos de processos de envelhecimento: "prematuro" e "final de vida".

3.1 <u>Envelhecimento prematuro</u>

Os equipamentos considerados "prematuramente envelhecidos" são os que apresentam um processo de envelhecimento superior a sua idade cronológica real. A CESP os identifica quando o seu teor furfural indicar que sua isolação celulósica se apresenta 20% superior a sua idade real (fabricação) utilizando para tal a curva de correlação laboratorial "furfural x grau de polimerização" elaborada pelo pesquisador inglês P.Burton, que é mostrada a seguir na Figura 3.

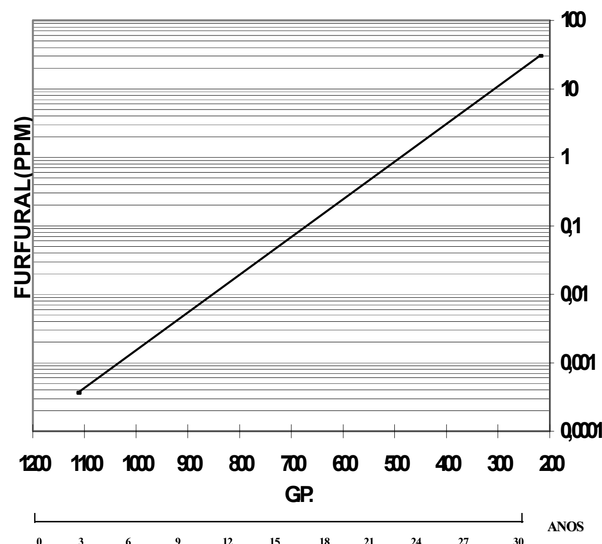


Figura 3

Como exemplo, se um transformador de 18 anos de idade apresenta 2ppm de furfural no óleo; será considerado "prematuramente

envelhecido" pois a sua idade esperada será de 24 anos (GP=450), ou seja 33% acima da sua idade real.

A situação atual de envelhecimento do universo de transformadores e reatores CESP pode ser avaliada na Figura 4, onde são apresentados percentuais de envelhecimento relativo, em relação a curva de Burton.

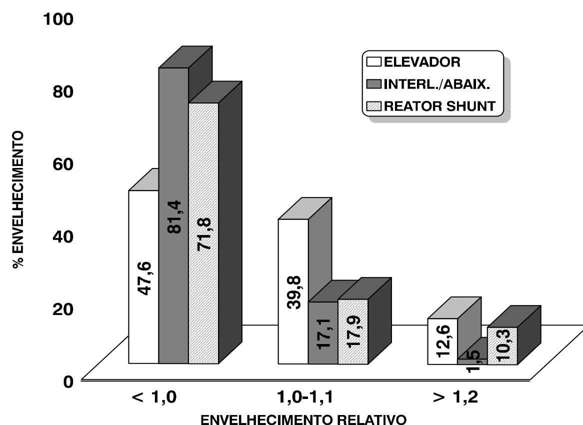


Figura 4

3.2 Evolução do furfural (final de vida)

Existem também outros tipos de casos de envelhecimento crítico (final de vida), cujos equipamentos não podem ser classificados como prematuramente envelhecidos pois estão operando há mais de 20 anos no Sistema, ou seja, por mais elevada que possa ser a sua concentração de furfural, dificilmente indicará idade superior a 20% da sua idade real.

Para esses casos a CESP acompanha a evolução da concentração de furfural ao longo do tempo, com periodicidades de ensaio especiais anuais ou até mesmo semestrais.

A experiência prática da CESP mostra que quando a isolação sólida já está bem comprometida e próxima ao final de vida útil, o perfil do teor furfural cresce desproporcionalmente entre períodos de análise, com evoluções abruptas na sua concentração. Para valores acima de 4ppm já é bem provável que o equipamento possua partes de sua isolação celulósica com grau de polimerização abaixo de 200.

3.3 Alternativas para solução dos problemas

A partir da seleção de um transformador envelhecido pelo seu teor furfural, deverão ser estudados os motivos possíveis que o levaram a essa situação. Nessa etapa é imprescindível a análise criteriosa de diversos dados estatísticos de operação do equipamento, tais como: carregamento histórico, máximas temperaturas, tratamentos/reparos anteriores, características físico-químicas do óleo, cromatografia gasosa, etc.

Após a análise de todos esses dados é prevista uma inspeção interna no equipamento, quando serão coletadas amostras de papel isolante dos cabos de ligação às buchas de AT e BT, para determinação do grau de polimerização médio. Se esse valor de GP dos cabos confirmar o envelhecimento, as etapas seguintes serão condicionadas a análises circunstanciais de custo x benefício, podendo abranger as possíveis situações:

- redução do carregamento máximo permissível;
- contratação do reparo preventivo;
- aquisição de unidade reserva;
- negociações contratuais com o fabricante.

4.0 - EXEMPLOS PRÁTICOS ESTUDADOS

A seguir serão apresentados casos práticos de transformadores que apresentam envelhecimento prematuro e casos de envelhecimento de final de vida e as soluções técnico/econômicas adotadas. Em todos esses casos o diagnóstico inicial do furfural foi confirmado nas inspeções internas.

4.1 Transformador elevador da usina Rosana

Trata-se de um transformador elevador trifásico, 138/13,8 kV, 89 MVA, fabricado em 1986 e que entrou em operação em 05/87. Em 09/90, a primeira análise do teor furfural apresentou um resultado de 2,92 ppm, que era significativamente elevado para um equipamento com até então 4 anos de idade cronológica; pois pela curva laboratorial de Burton a idade esperada seria de 25 anos (GP = 400); sendo portanto

selecionado como equipamento prematuramente envelhecido e retirado de operação em 08/91 tendo operado por apenas 1192 dias (descontando os períodos de parada da máquina geradora).

As análises cromatográficas e físico-químicas não indicavam nenhum tipo de anormalidade e o perfil de carregamento dessa unidade era 24 horas diárias a plena carga, condição essa ditada pela própria característica hidráulica da Usina. Apesar do rígido regime de carregamento, as temperaturas de óleo e enrolamento sempre se mantiveram em níveis normais.

O equipamento foi inspecionado internamente no campo e as amostras de papel isolante dos cabos das buchas de AT e BT proporcionaram um GP médio de 403, ou seja, igual ao anteriormente indicado pelo teor furfural.

Após várias discussões técnicas com o fabricante, o equipamento foi levado para a fábrica para inspeção mais detalhada, envolvendo a desmontagem da sua parte ativa. Esse serviço foi realizado em 08/94, quando foi constatado que as bobinas de AT e BT estavam bastante escurecidas e com o papel isolante quebradiço, sendo possível também determinar que a depreciação ocorreu de fora para dentro pois o GP médio do papel isolante externo das bobinas de AT e BT foi de 293 enquanto que para o papel mais interno das bobinas o GP foi de 383.

Foi descartada logo de início a possibilidade do envelhecimento ter ocorrido durante a sua operação; pois seria necessário que o equipamento operasse com 30 % de sobrecarga, 24 horas em todos os dias do seu período total de operação, para atingir tamanha degradação. A causa que motivou esse envelhecimento está certamente associada a algum processo indevido durante a sua fabricação ou mesmo a qualidade da matéria-prima utilizada.

O fabricante realizou reparo total dessa unidade, incluindo substituição total de sua parte ativa, sem qualquer ônus para CESP.

4.2 Transformadores elevadores da usina Chavantes

Este caso refere-se ao envelhecimento determinado em quatro transformadores elevadores trifásicos, 13,8/230 kV, 115 MVA, fabricados em 1969 e que operavam desde 1971 na Usina Chavantes.

Em 09/90, quando esses trafos tinham 21 anos, foram realizadas as primeiras medições experimentais do teor furfural, obtendo-se resultados bem elevados:

- **TR1: 3,86ppm**
- **TR2: 4,38ppm**
- **TR3: 6,84ppm**
- **TR4: 3,29ppm**

Em 15/10/90, um mês após as análises experimentais de furfural, a unidade TR3 falhou eletricamente. Destaque-se que um dia antes, houve rejeição de carga na Usina devido a problemas no Sistema Interligado, provocando sobrecarga instantânea nesses transformadores.

O transformador foi levado ao fabricante em 02/92 para inspeção interna, onde constatou-se que o motivo da falha elétrica foi uma descarga entre espiras em uma das camadas da fase central da BT. Contudo, o mais importante nessa inspeção foi a constatação de que nas outras 2 fases da BT não danificadas pela ocorrência, o papel isolante estava totalmente carbonizado e sem qualquer rigidez mecânica, com GP medido de 98.

Concluiu-se que ocorreu um sobreaquecimento localizado em uma das camadas da BT (3 fases), motivado pela ineficiente refrigeração naquele local, provocando a degradação do seu papel isolado. O equipamento falhou porque a isolação sólida não foi capaz de suportar as solicitações mecânicas quando da ocorrência no Sistema.

Em função desse problema estar associado à deficiência no projeto e também dos resultados crescentes do teor furfural dos outros 3 transformadores em operação, a CESP decidiu contratar o "reparo preventivo" dos mesmos;

constando da Especificação Técnica dos Serviços a possibilidade de decidir quanto a extensão do reparo, no momento da sua abertura em fábrica; ou seja, de acordo com o estudo do papel isolante poderia ser substituída desde a BT até todas as bobinas do transformador. Isso permitiu à CESP um melhor gerenciamento da necessidade premente do reparo, adequando o investimento à disponibilidade operativa.

A unidade TR2 já foi reparada em 05/95 e também foi constatado valor de GP para BT inferior a 100; confirmando alto teor de furfural inicialmente obtido.

Outro ponto muito interessante a ser destacado, é o perfil de evolução do furfural nas 2 outras unidades que continuaram em operação aguardando o envio ao fabricante; como pode ser observado na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Elevação de furfural de Chavantes

ENSAIO	TR1	TR4
01/93	3,98	3,51
05/93	4,89	4,31
12/93	4,37	5,09
07/94	5,48	5,15
01/95	5,42	5,25
06/96	11,74	7,29

O perfil de evolução do teor furfural nesses trafos é típico de equipamentos em final de vida útil da isolação pois os resultados mais recentes (06/96) apresentaram "picos" de evolução desproporcionais em relação ao padrão anterior. Como citado anteriormente em 3.2 essa é uma boa indicação de que a isolação sólida já está mecanicamente frágil.

A unidade TR1 foi retirada de operação em 08/96 e enviada ao fabricante; quando mais uma vez observou-se as bobinas de baixa tensão totalmente degradadas, com grau de polimerização inferior a 80.

4.3 Transformadores elevadores da usina Ibitinga

Trata-se do caso de 3 unidades elevadoras trifásicas de 48,75MVA, 13,8/138kV, fabricadas em 1968 e que operam desde aquela época na usina Ibitinga.

Os primeiros resultados obtidos no início do controle, já apresentavam valores de furfural significativamente elevados, porém compatíveis com sua idade real. Entretanto as análises periódicas posteriores ajudaram a solidificar a suspeita de envelhecimento, pois apresentavam concentrações em franca evolução; conforme pode ser observado na Tabela 2:

Tabela 2: Elevação de furfural de Ibitinga

ENSAIO	TR1	TR2	TR3
01/93	3,04	4,98	2,64
01/94	4,75	5,49	4,21
06/95	4,84	6,74	4,89

No final de 1995, esses 3 transformadores passaram por inspeção interna na própria usina, quando foram coletadas amostras de papel isolante da camada externa das bobinas de alta tensão para determinação em laboratório do grau de polimerização, que apresentaram resultados extremamente baixos, confirmando a expectativa de envelhecimento típico de final de vida. Os valores de GP foram:

- **TR1: 178**
- **TR2: 168**
- **TR3: 186**

Os 3 equipamentos estão em operação normal aguardando a contratação do "reparo preventivo", com substituição da isolação sólida original, prevista para 1997.

5.0 - CONCLUSÕES

Transformadores elevadores e transformadores sem um sistema eficaz de preservação de óleo apresentam resultados de teor

furfural significativamente mais elevados do que os demais. Torna-se importante prever melhoria nos sistemas de selagem dos transformadores com respiro livre, bem como melhorias nos sistemas de selagens existentes.

O critério adotado pela CESP para definição de envelhecimento de um transformador, apresentou resultados positivos, permitindo a adoção de soluções planejadas e economicamente adequadas. Esse critério tende a ser cada vez mais eficaz, conforme o aumento do número de laudos periódicos de cada equipamento no banco de dados.

Pela experiência da CESP, concentrações elevadas (acima de 4ppm), indicam a existência de partes da isolação sólida comprometida, abaixo do limite de resistência mecânica confiável.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

(1)BURTON, P.J. et al., “Applications of Liquid Chromatography to the Analysis of Furfural of Electrical Insulating Materials”, CICRÉ Paper 15-08, 1988.

(2)PABLO, A. et al., “Furanic Compounds Analysis as a Tool for Diagnostic and Maintenance of Oil - Paper Insulation Systems”, CIGRÉ Paper 110-09, Symposium Berlin, 1993.

(3)BURTON, P.J. “The Analysis of Insulating Oil for Products Specific to the Low Temperature Overheating of Paper Insulating”,Notes for WG 15-01, 1985.for CIGRÉ WG 15-01, 1985.

(4)CORVO, A.M. et al., “Cromotografia Líquida de Alto Desempenho para Acompanhamento do Envelhecimento de Transfomadores”, 6º Congresso Ibero-Americano de Manutenção, Barcelona, 1991.

(5)DIOGO, A.C.T. e Ferratone, D., “Envelhecimento de Transformadores Determinado por Análises Preditivas de Manutenção”, 1º SEMASE - Seminário de Manutenção do SCM, 1995.